



**TUGAS AKHIR - TF 141581**

***ANALISA PENGARUH MASSFLOWRATE SPRAY  
COOLING SYSTEM TERHADAP HIGH AMBIENT  
TEMPERATURE PADA UQ NATURAL DRAFT  
DRY COOLING TOWER MENGGUNAKAN CFD***

JUDIKA LODEWIJK SIAGIAN  
NRP. 02311440000005

Dosen Pembimbing  
Ir. Roekmono, M.T  
Ir. Harsono Hadi, M.T., Ph.D

DEPARTEMEN TEKNIK FISIKA  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2018

*Halaman ini sengaja dikosongkan*



***FINAL PROJECT - TF 141581***

***ANALYSIS OF MASSFLOWRATE SPRAY  
COOLING SYSTEM EFFECT ON HIGH AMBIENT  
TEMPERATURE IN UQ NATURAL DRAFT DRY  
COOLING TOWER USING CFD METHOD***

JUDIKA LODEWIJK SIAGIAN  
NRP. 02311440000005

*Supervisors :*  
Ir. Roekmono, M.T  
Ir. Harsono Hadi, M.T., Ph.D

***ENGINEERING PHYSICS DEPARTMENT  
Faculty of Industrial Technology  
Sepuluh Nopember Institute of Technology  
Surabaya 2018***

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## **PERNYATAAN BEBAS PLAGIARISME**

Saya yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama	: Judika Lodewijk Siagian
NRP	: 02311440000005
Departemen / Prodi	: Teknik Fisika / S1 Teknik Fisika
Fakultas	: Fakultas Teknologi Industri
Perguruan Tinggi	: Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul “Analisa Pengaruh *Massflowrate Spray Cooling System* terhadap *High Ambient Temperature* pada *UQ Natural Draft Dry Coling Tower* Menggunakan CFD ” adalah benar-benar karya saya sendiri dan bukan plagiat dari orang lain. Apalagi di kemudian hari terbukti terdapat plagiat pada Tugas Akhir ini, maka saya bersedia untuk menerima sanksi sesuai ketentuan yang berlaku.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sebenar-benarnya.

Surabaya, 5 Juni 2018  
Yang membuat pernyataan,

Judika Lodewijk Siagian  
NRP. 02311440000005

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

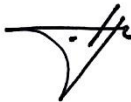
**LEMBAR PENGESAHAN**  
**ANALISA PENGARUH *MASSFLOWRATE SPRAY***  
***COOLING SYSTEM* TERHADAP *HIGH AMBIENT***  
***TEMPERATURE* PADA *UQ NATURAL DRAFT DRY***  
***COOLING TOWER* MENGGUNAKAN *CFD***

**TUGAS AKHIR**

Oleh :  
**JUDIKA LODEWIJK SIAGIAN**  
**NRP. 02311440000005**

Surabaya, 26 Juli 2018  
Mengetahui / Menyetujui,

**Pembimbing I**



**Ir. Roekmono, M.T.**  
**NIP. 195809081986011001**

**Pembimbing II**



**Ir. Harsono Hadi, M.T., Ph.D.**  
**NIP. 196001191986111001**

**Kepala Departemen**  
**Teknik Fisika FTI – ITS**



**Agus Muhammad Hatta, S.T., M.Si., Ph.D**  
**NIP. 19780902 200312 1 002**









**LEMBAR PENGESAHAN**  
**ANALISA PENGARUH MASSFLOWRATE SPRAY COOLING**  
**SYSTEM TERHADAP HIGH AMBIENT TEMPERATURE**  
**PADA UQ NATURAL DRAFT DRY COOLING TOWER**  
**MENGGUNAKAN CFD**

**TUGAS AKHIR**  
**Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat**  
**Memperoleh Gelar Sarjana Teknik**  
**pada**  
**Bidang Studi Rekayasa Energi**  
**Program Studi S-1 Jurusan Teknik Fisika**  
**Fakultas Teknologi Industri**  
**Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

Oleh:  
**JUDIKA LODEWIJK SIAGIAN**  
**NRP 02311440000005**

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Ir. Roekmono, M.T.  ..... (Pembimbing I)
2. Ir. Harsono Hadi, M.T., Ph.D.  ..... (Pembimbing II)
3. Ir. Sarwono, MM  ..... (Penguji I)
4. Dr.ing. Doty Dewi Risanti, S.T., M.T.  (Penguji II)

**SURABAYA**  
**JULI 2018**



**ANALISA PENGARUH *MASSFLOWRATE SPRAY COOLING SYSTEM* TERHADAP *HIGH AMBIENT TEMPERATURE* PADA *UQ NATURAL DRAFT DRY COOLING TOWER* MENGGUNAKAN CFD**

**Nama Mahasiswa** : Judika Lodewijk Siagian  
**NRP** : 02311440000005  
**Departemen** : Teknik Fisika FTI-ITS  
**Dosen Pembimbing** : 1. Ir. Roekmono, M.T  
2. Ir. Harsono Hadi, M.T., Ph.D

**Abstrak**

*High Ambient Temperature* merupakan masalah yang umum pada proses pendinginan *cooling tower* terkhusus tipe *Natural Draft Dry* yang menggunakan udara ambien sebagai pendinginnya. Masalah ini dapat diatasi dengan menggunakan *spray cooling system* yang dipasang pada bagian bawah menara sehingga menciptakan proses pra-pendinginan atau pendinginan udara sebelum masuk ke *cooling tower*. Hal ini dilakukan untuk mendapat *temperature drop* pada udara ambien. Penelitian ini dilakukan menggunakan *computational fluid dynamic (CFD)* dengan Universitas Queensland (UQ) *Natural Draft Dry Cooling Tower* sebagai objek penelitian. *Spray Cooling System* menggunakan nosel dipasang secara vertikal pada kaki menara pada ketinggian  $H = 1$  meter, 2 meter, 3 meter, 4 meter, 4,8 meter. *Temperature drop* yang diperoleh bergantung kepada *massflowrate* nosel. *Massflowrate* yang digunakan pada masing-masing nosel secara berurutan adalah 10 g/s; 12,62 g/s; 15,78 g/s; 19,72 g/s; 24,65 g/s. Penggunaan variasi *massflowrate* yang berbeda menyebabkan perbedaan daerah sentuh radiator dengan udara dingin dan pemerataan *temperature drop*. Pada penggunaan 5 nosel secara bersamaan akan memberikan nilai rata-rata *temperature drop* 3,06°C pada radiator.

**Kata kunci** : *Spray cooling system, massflowrate, computational fluid dynamic (CFD)*

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

**ANALYSIS OF MASSFLOWRATE SPRAY COOLING  
SYSTEM EFFECT ON HIGH AMBIENT TEMPERATURE  
IN UQ NATURAL DRAFT DRY COOLING TOWER USING  
CFD METHOD**

**Name** : Judika Lodewijk Siagian  
**NRP** : 02311440000005  
**Department** : Engineering Physics FTI-ITS  
**Supervisors** : 1. Ir. Roekmono, M.T  
2. Ir. Harsono Hadi, M.T., Ph.D

***Abstract***

*High Ambient Temperature is a common problem in the cooling process of cooling tower especially Natural Draft Dry type which uses ambient air as coolant. This problem can be solved by using a spray cooling system mounted on the bottom of the tower so as to create a pre-cooling or cooling process before entering the cooling tower. This is done to get temperature drop on ambient air. This research was conducted using computational fluid dynamic (CFD) with Queensland University (UQ) Natural Draft Dry Cooling Tower as research object. Spray Cooling System uses a nozzle mounted vertically on the foot of the tower at an altitude of  $H = 1$  meter, 2 meters, 3 meters, 4 meters, 4.8 meters. The drop temperature obtained depends on the nozzle massflowrate. The massflowrate used in each of the respective nozzles is 10 g / s; 12.62 g / s; 15.78 g / s; 19.72 g / s; 24.65 g / s. The use of different massflowrate variations leads to differences in radiator touch areas with cold air and equalization of temperature drop. On the use of 5 nozzles simultaneously will provide an average temperature drop rating of  $3.06^{\circ}\text{C}$  on the radiator.*

**Key Word** : *Spray cooling system, massflowrate, computational fluid dynamic (CFD)*

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadirat Tuhan Yang Maha Esa atas berkat dan kasih karunia-Nya penulis dapat menyelesaikan laporan penelitian Tugas Akhir yang berjudul “Analisa Pengaruh *Massflowrate Spray Cooling System* terhadap *High Ambient Temperature* pada UQ *Natural Draft Dry Cooling Tower* menggunakan CFD”.

Pelaksanaan penelitian Tugas Akhir ini tidak terlepas dari bantuan berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada :

1. Orang - orang spesial, Bapak Tunggul Siagian dan Ibu Tiodor Purba, serta Abang Bertho Pratama Siagian dan Kakak Marlina Adriana Siagian yang selalu menjadi motivasi dan doa
2. Bapak Ir. Roekmono, M.T dan Bapak Ir. Harsono Hadi, M.T., Ph.D. selaku dosen pembimbing yang senantiasa sabar memberikan bimbingan, motivasi, dan arahan dalam menyelesaikan penelitian ini
3. Bapak Dr. Gunawan Nugroho, S.T., M.T. selaku kepala Laboratorium Rekayasa Energi dan Pengkondisian Lingkungan yang telah mendukung kegiatan simulasi
4. Teman – teman TA-wan yang bekerja siang dan malam dalam menyelesaikan tugas akhir
5. Teman – teman Kelompok Studi Energi Teknik Fisika ITS
6. Teman – teman 2014 yang selalu asik dan kece, teman seperjuangan
7. Teman – teman penghuni KEKERHOUSE yang mau mengerti kondisi dan situasi penulis
8. Teman – teman ABISS 2014 secara khusus yang juga berjuang untuk memberikan yang terbaik dan ABISS secara umum yang selalu menjadi tempat kumpul yang menyenangkan
9. Blue Eyes Ultimate Dragon Perfect Form Powerful Balance yang selalu memampukan dirinya untuk dikendarai dan memberikan kenyamanan terbaik saat penulis merasa suntuk dan putus asa.

10. YouTube, Google, ScienceDirect, Google Translate yang selalu memberikan dukungan dan bantuan ilmu pengetahuan kepada penulis
11. AntiWacana grup yang selalu mengajak untuk menonton yang menghabiskan banyak waktu penulis
12. Dua orang spesial lainnya, Marintan Siagian dan Grace Butar-butar, adik beda ayah-ibu, yang memberikan perhatian dan menjadi semangat tersendiri bagi penulis
13. Dan semua orang yang terlibat yang tidak bias disebutkan satu persatu.

Jika dalam penulisan laporan penelitian ini terdapat kesalahan maka saran dan kritik yang membangun dari semua pihak sangat diharapkan. Penulis berharap semoga laporan ini dapat menambah wawasan yang bermanfaat bagi pembacanya.

Surabaya, 5 Juni 2018

Penulis.



## DAFTAR ISI

Halaman Awal	i
Cover Page	iii
Lembar Pengesahan I	vii
Lembar Pengesahan II	ix
Abstrak	xi
<i>Abstract</i>	xiii
KATA PENGANTAR	xv
DAFTAR ISI	xvii
DAFTAR GAMBAR	xix
DAFTAR TABEL	xxi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan	3
1.5 Sistematika Laporan	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 <i>Natural Draft Dry Cooling Tower</i>	5
2.2 Perpindahan Panas	7
2.3 Proses Pra-pendinginan	9
2.4 Fase Kontinyu	11
2.5 Fase Diskrit	11
2.6 Lintasan Droplet	12
2.7 Computational Fluid Dynamic (CFD)	12
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	15
3.1 Diagram Alir Penelitian	15
3.2 Pembuatan Geometri	17

3.3	<i>Meshing</i>	19
3.4	<i>Pre-processing</i>	20
3.5	Post-processing	24
BAB IV	ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN	25
4.1	Validasi Desain Simulasi	25
4.2	<i>Velocity</i> Udara Inlet	28
4.3	Pengaruh <i>Massflowrate</i>	30
4.4	Pengaruh Posisi <i>Spray Cooling System</i>	33
4.5	Aplikasi	37
BAB V	PENUTUP	41
5.1	Kesimpulan	41
5.2	Saran	41
DAFTAR PUSTAKA		43

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2. 1</b>	Dua jenis utama cooling tower [3]	5
<b>Gambar 2. 2</b>	Siklus fluida kerja pendingin pada menara pendingin [4]	6
<b>Gambar 2. 3</b>	UQ Gatton Natural Draft Dry Cooling Tower [5]	7
<b>Gambar 2. 4</b>	a) Bentuk asli menara UQ NDDCT dan b) sketsa proses pra-pendinginan [6]	11
<b>Gambar 3. 1</b>	Skema diagram alir penelitian tugas akhir	16
<b>Gambar 3. 2</b>	Geometri UQ NDDCT	18
<b>Gambar 3. 3</b>	Hasil meshing geometri	20
<b>Gambar 3. 4</b>	Setup pada bagian general	21
<b>Gambar 3. 5</b>	Setup pada bagian model	23
<b>Gambar 3. 6</b>	Hasil perhitungan yang sudah konvergen menggunakan Fluent	24
<b>Gambar 4. 1</b>	Grafik perbandingan <i>velocity</i>	26
<b>Gambar 4. 2</b>	<i>Velocity</i> pada simulasi UQ NDDCT	28
<b>Gambar 4. 3</b>	Persebaran tekanan pada NDDCT	29
<b>Gambar 4. 4</b>	Analogi pendekatan kesetimbangan laju aliran massa	30
<b>Gambar 4. 5</b>	Grafik temperature setelah diberlakukan variasi <i>massflowrate</i>	32
<b>Gambar 4. 6</b>	Sketsa daerah titik sentuh radiator	34
<b>Gambar 4. 7</b>	Profil temperatur nosel H = 1 meter	34
<b>Gambar 4. 8</b>	Profil temperatur nosel H = 2 meter	35
<b>Gambar 4. 9</b>	Profil temperatur nosel H = 3 meter	36
<b>Gambar 4. 10</b>	Profil temperatur nosel H = 4 meter	36
<b>Gambar 4. 11</b>	Profil temperatur nosel H = 4,8 meter	37
<b>Gambar 4. 12</b>	Profil temperatur penggunaan 5 nosel secara bersamaan dengan variasi <i>massflowrate</i>	40

**Gambar 4. 13** Grafik temperatur penggunaan 5 nosel secara  
bersamaan dengan variasi *massflowrate* 38

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 3. 1</b> Spesifikasi geometri NDDCT	18
<b>Tabel 3. 2</b> Spesifikasi meshing	19
<b>Tabel 3. 3</b> Kondisi batas geometri pada simulasi	20
<b>Tabel 3. 4</b> Spesifikasi injeksi droplet pada simulasi	22
<b>Tabel 4. 1</b> Validasi simulasi berdasarkan <i>velocity</i>	25
<b>Tabel 4. 2</b> Validasi simulasi berdasarkan <i>temperature drop</i>	27
<b>Tabel 4. 3</b> Nilai pendekatan kesetimbangan laju aliran massa	31
<b>Tabel 4. 4</b> Variasi <i>massflowrate</i> nosel terhadap jarak dengan radiator	31
<b>Tabel 4. 5</b> Perbedaan nilai <i>temperature drop</i> hasil perhitungan dengan simulasi	33
<b>Tabel 4. 6</b> Daerah titik sentuh radiator dipengaruhi oleh nosel	37

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang**

Musim kemarau yang mampu meningkatkan suhu lingkungan menjadi masalah yang cukup serius bagi proses pendinginan industri. Tingginya suhu lingkungan (*high ambient temperature/HAT*) menyebabkan penurunan performa pendinginan menara pendingin (*cooling tower*), terutama jenis *natural draft dry cooling tower* (NDDCT). Selama terjadi HAT, kinerja NDDCT menurun sebesar 20% dan daya keluaran pada pembangkit listrik tenaga panasss bumi menurun sebesar 50 <sup>[1]</sup>.

*Natural draft cooling tower* merupakan jenis menara pendingin yang memanfaatkan lingkungan dalam proses pendinginannya. Menara pendingin tipe ini dibagi menjadi dua jenis yaitu jenis *wet* dan *dry*. *Natural draft wet cooling tower* membutuhkan sedikit biaya untuk pembuatannya namun tidak untuk perawatannya. Menara pendingin ini membutuhkan air yang cukup banyak untuk proses pendinginannya sehingga biaya perawatannya akan sangat besar. *Natural draft dry cooling tower* lebih menguntungkan di daerah gersang karena penggunaan air lebih sedikit. Namun konstruksi yang mendukung performa menara ini membutuhkan biaya yang besar. NDDCT menggunakan prinsip kerja perbedaan temperatur udara ambien dengan udara panas pada bagian dalam menara. Udara segar akan masuk dari bagian bawah menara dan menggantikan udara panas yang keluar dari bagian atas menara. Kinerja menara ini sangat dipengaruhi oleh suhu udara lingkungan sehingga kenaikan suhu udara yang besar (*high temperature ambient*) akan menurunkan performa pendinginannya.

*High Ambien Temperature* dapat diatasi dengan menambahkan proses pra-pendinginan dengan sistem *spray cooling sistem* pada sistem kerja NDDCT. Proses pra-pendinginan akan menurunkan suhu ambien yang masuk kedalam menara pendingin dengan menambahkan nosel. Pada penelitian Yubiau Sun, dkk. penelitian dilakukan dengan menambahkan *spray cooling system* menggunakan nosel dengan *mass flowrate* konstan yakni 5 g/s dan variasi sudut. Variasi sudut pada setiap ketinggian nosel memberikan efek berbeda pada proses pra-pendinginan [2]. Namun dalam aplikasinya, nosel akan pasang permanen sehingga variasi yang dilakukan adalah pada *mass flowrate*. Besarnya *mass flowrate* nosel didasarkan pada tinggi nosel dari permukaan tanah dan respon perubahan suhu pada bagian radiator NDDCT.

Penelitian sebelumnya dilakukan dengan *spray cooling system* menggunakan nosel dengan ketinggian (H) 1 meter, 2 meter, 3 meter, 4 meter, dan 4,8 meter. Penelitian dilakukan membandingkan nosel satu – persatu dengan variasi sudut yang berbeda-beda. Didapatkan hasil dengan *mass-flowrate* 5 g/s, nosel dengan H = 3 meter dan H = 4 meter akan menurunkan suhu pada bagian pusat radiator dan nosel yang posisinya lebih tinggi yakni nosel H = 4,8 meter akan berfungsi mendinginkan bagian tengah radiator. Namun, pada aplikasi di industri, nosel yang akan dipasang pastilah akan digunakan, dan penggunaan tersebut dilakukan secara bersamaan. Respon efesiensi sudut nosel juga akan berubah sesuai dengan kecepatan udara masuk kebagian inlet pada menara pendingin. Maka dari itu, penggunaan nosel dengan variasi sudut tidak akan selalu meningkatkan efesiensi proses pra-pendinginan sehingga nosel akan dipasang secara permanen dengan sudut tengak lurus dengan tiang penyangga menara pendingin. Untuk meningkatkan efesiensi pra-pendinginan dilakukan dengan variasi *mass-flowrate* air yang melewati nosel.



Diharapkan, variasi *mass-flowrate* ini akan mengatasi dan menjawab permasalahan efisiensi pada proses pra-pendinginan.

## 1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang tersebut, maka permasalahan yang dibahas pada penelitian ini adalah bagaimana pengaruh *mass flowrate* pada proses pra-pendinginan dengan menggunakan *spray cooling system* menggunakan nosel dalam mengatasi *high ambient temperature* pada bagian radiator *natural draft dry cooling tower* menggunakan *computational fluid dynamics* (CFD).

## 1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

- a. Geometri yang digunakan ialah *natural draft dry cooling tower* yang merujuk pada penelitian Xiaoxiao Li dkk. pada tahun 2016 yang berjudul *Simulation of OQ Gatton natural draft dry cooling tower*.
- b. Objek pengamatan adalah *temperature drop* udara ambien di daerah radiator cooling tower akibat proses pra-pendinginan oleh *spray cooling system*.
- c. Simulasi untuk mengetahui profil temperatur pada geometri *cooling tower* menggunakan CFD.
- d. Set point temperatur udara ambien ialah 35°C
- e. Terjadi evaporasi sempurna pada saat percampuran udara panas dengan air (droplet).

## 1.4 Tujuan

Tujuan tugas akhir ini adalah untuk mengetahui pengaruh *mass flowrate* pada proses pra-pendinginan dengan *spray cooling system* menggunakan nosel dalam mengatasi *high ambient*

*temperature* pada bagian radiator *natural draft dry cooling tower* menggunakan *computational fluid dynamics* (CFD).

### **1.5 Sistematika Laporan**

Laporan penelitian Tugas Akhir ini akan disusun dengan sistematika sebagai berikut:

#### **BAB I Pendahuluan**

Bab ini berisi latar belakang, rumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, dan sistematika laporan.

#### **BAB II Tinjauan Pustaka**

Bab ini berisi teori – teori penunjang yang mendasari Tugas Akhir ini, baik yang bersumber dari buku, jurnal, maupun laporan tugas akhir atau penelitian terkait.

#### **BAB III Metodologi Penelitian**

Dalam bab ini dijelaskan mengenai tahapan – tahapan yang dilakukan dalam pelaksanaan Tugas Akhir, dimulai dari studi literatur hingga pengambilan data, pembahasan, dan penarikan kesimpulan.

#### **BAB IV Analisis Data dan Pembahasan**

Pada bab ini ditampilkan data yang didapat dari proses simulasi disertai analisisnya. Dari hasil analisis tersebut dilakukan pembahasan sesuai tujuan penelitian.

#### **BAB V Penutup**

Bab ini berisi kesimpulan dari keseluruhan Tugas Akhir serta saran untuk pengembangan penelitian selanjutnya.

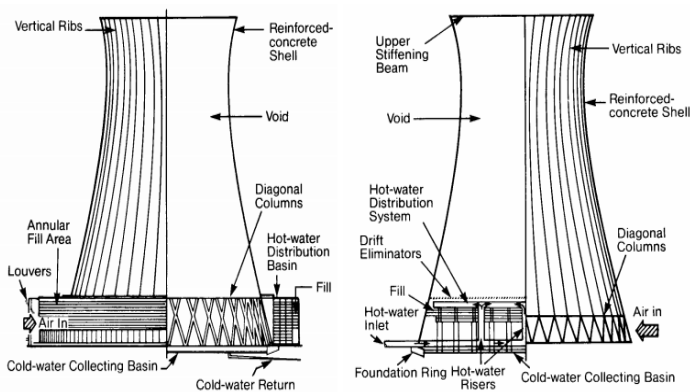
## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 *Natural Draft Dry Cooling Tower*

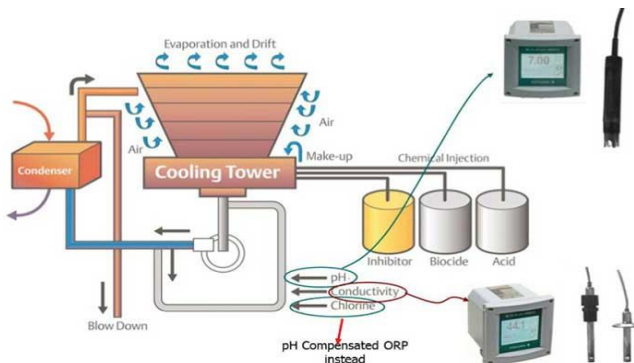
*Natural Draft Dry Cooling Tower* menggunakan prinsip kerja perbedaan temperatur udara ambien dengan udara panas pada bagian dalam menara. Udara segar akan masuk melalui bagian bawah menara untuk menggantikan udara panas yang keluar melalui bagian atas menara. Kontruksi beton banyak digunakan untuk dinding menara dengan ketinggian hingga mencapai 200 m. Menara pendingin tersebut kebanyakan hanya digunakan untuk jumlah panas yang besar sebab struktur beton yang besar cukup mahal. Terdapat dua jenis utama *natural draft cooling tower*:

- Menara aliran melintang: udara dialirkan melintasi air yang jatuh dan bahan pengisi berada diluar menara.
- Menara dengan aliran yang berlawanan arah: udara dihisap melalui air yang jatuh dan oleh karena itu bahan pengisi terletak dibagian dalam menara, walaupun desain tergantung pada kondisi tempat yang spesifik.

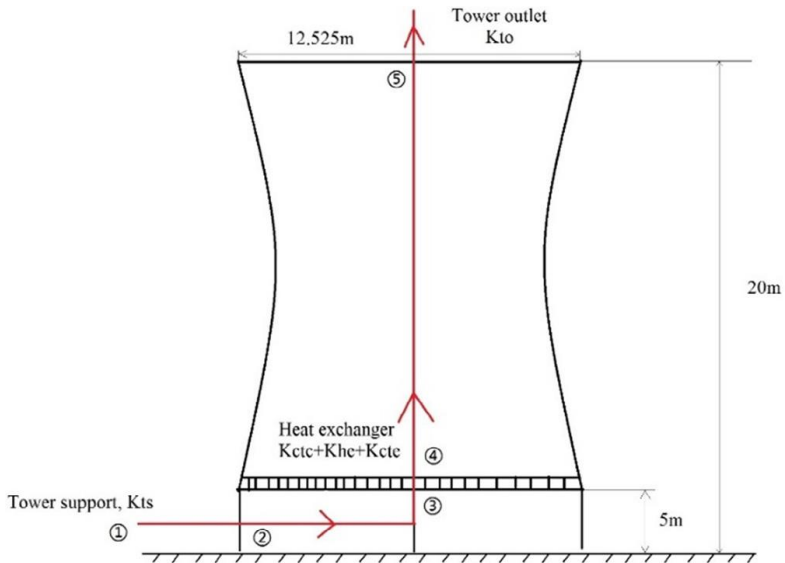


**Gambar 2.1** Dua jenis utama cooling tower [3]

Menara pendingin (*cooling tower*) merupakan unit transfer panas yang digunakan untuk memindahkan panas dari unit pendingin fluida. Perpindahan panas menara pendingin dapat dikatakan evaporatif karena memungkinkan sebagian kecil dari fluida yang didinginkan menguap. Menara pendingin dapat menggunakan penguapan air untuk menghentikan proses pemanasan dan mendinginkan fluida kerja ke suhu mendekati *wet-bulb temperature* atau menggunakan udara untuk mendinginkan fluida kerja ke suhu mendekati *dry-air temperature*. *Wet-bulb temperature* adalah jenis pengukuran suhu yang mencerminkan sifat fisik dari suatu sistem dengan campuran gas seperti udara dan uap air. *Dry-bulb temperature* adalah suhu udara yang terlindung dari radiasi dan kelembaban yang diukur dengan menggunakan termometer. Sistem pendingin re-sirkulasi menggunakan kembali fluida yang sama dengan melewatkannya melalui *heat exchanger*, kondensator atau menara pendingin untuk menghilangkan panas. Menara pendingin yang bersirkulasi ulang menciptakan proses pendinginan dengan cara evaporasi air dan juga melalui pertukaran panas langsung dengan udara yang melewati menara.



**Gambar 2.2** Siklus fluida kerja pendingin pada menara pendingin <sup>[4]</sup>



**Gambar 2.3** UQ Gatton Natural Draft Dry Cooling Tower <sup>[5]</sup>

*Univercity Queensland (UQ) Gatton Natural Draft Dry Cooling Tower* merupakan menara pendingin yang ditujukan untuk penelitian di Universitas Queensland. Menara pendingin ini memiliki tinggi 20 meter dan diameter dasar 12, 525 meter, tinggi inlet dengan permukaan tanah ialah 5 meter dengan *heat exchanger bundles* yang berjumlah 18 dan dipasang horizontal diatas penambang inlet.

## 2.2 Perpindahan Panas

Proses pendinginan udara dalam memanfaatkan panas laten yang disebabkan oleh penguapan tetesan air untuk membuang panas dari udara ambien, menghasilkan udara yang didinginkan [2]. Setelah butiran air atau disebut juga droplet yang diseprotkan bersentuhan dengan udara tak jenuh yang kering dan panas, perpindahan panas dan massa terjadi pada permukaan air dengan

udara. Konveksi yang merupakan mekanisme yang mendorong proses perpindahan panas pada penguapan droplet yang juga disertai dengan perpindahan panas laten yang disebabkan oleh penguapan terjadi saat air bersentuhan dengan udara. Air yang bersentuhan akan membentuk lapisan uap air jenuh dalam medium udara sekitar. Lapisan ini bertanggungjawab atas perpindahan panas yang disebabkan oleh perbedaan suhu antara droplet dengan udara tak jenuh. Sementara itu, perpindahan massa terjadi ketika adanya perbedaan konsentrasi uap antara lapisan uap dengan udara ambien. Maka kesetimbangan laju energi dan massa control volume pada *steady state* dinyatakan :

$$0 = \dot{Q}_{CV} - \dot{W}_{CV} + \dot{m}_1 \left( h_1 + \frac{v_1^2}{2} + g z_1 \right) + \dot{m}_2 \left( h_2 + \frac{v_2^2}{2} + g z_2 \right) - \dot{m}_3 \left( h_3 + \frac{v_3^2}{2} + g z_3 \right) \quad (2.1)$$

$$0 = \dot{m}_1 h_1 + \dot{m}_2 h_2 - \dot{m}_3 h_3 \quad (2.2)$$

$$\dot{m}_3 = \dot{m}_1 + \dot{m}_2 \quad (2.3)$$

$$0 = \dot{m}_1 h_1 + \dot{m}_2 h_2 - (\dot{m}_1 + \dot{m}_2) h_3 \quad (2.4)$$

dimana :

$\dot{W}_{CV}$  = aliran kerja pada daerah dimana udara masuk di inlet dan keluar di outlet

$\dot{Q}_{CV}$  = Transfer panas permukaan luar dengan sekitar

$\dot{m}_1$  = *massflowrate* udara (kg/s)

$\dot{m}_2$  = *massflowrate* air (droplet) (kg/s)

$\dot{m}_3$  = *massflowrate* udara dingin (kg/s)

$h_1$  = entalpi udara (kJ/kg)

$h_2$  = entalpi air (droplet) (kJ/kg)

- $h_3$  = entalpi udara dingin (kJ/kg)  
 $V_1$  = volume udara ( $m^3$ )  
 $V_2$  = volume air (droplet) ( $m^3$ )  
 $V_3$  = volume udara dingin ( $m^3$ )  
 $g$  = gravitasi ( $m/s^2$ )  
 $z_1$  = ketinggian udara (m)  
 $z_2$  = ketinggian air (droplet) (m)  
 $z_3$  = ketinggian udara dingin (m)

Jarak antara sumber droplet dengan titik ukur (radiator) sangat berpengaruh pada nilai *massflowrate* nosel. Hubungan *massflowrate* dengan jarak nosel dengan radiator dinyatakan dalam:

$$\dot{m}_{2D} = \frac{XD - Xd}{(XD - Xd) - 0,2} \times \dot{m}_{2d} \quad (2.5)$$

dimana :

- $\dot{m}_{2d}$  = *massflowrate* air (droplet) yang memiliki jarak yang lebih kecil dengan radiator (kg/s)  
 $\dot{m}_{2D}$  = *massflowrate* air (droplet) yang memiliki jarak yang lebih besar dengan radiator (kg/s)  
 $Xd$  = jarak nosel  $\dot{m}_{2d}$  dengan radiator  
 $XD$  = jarak nosel  $\dot{m}_{2D}$  dengan radiator.

### 2.3 Proses Pra-pendinginan

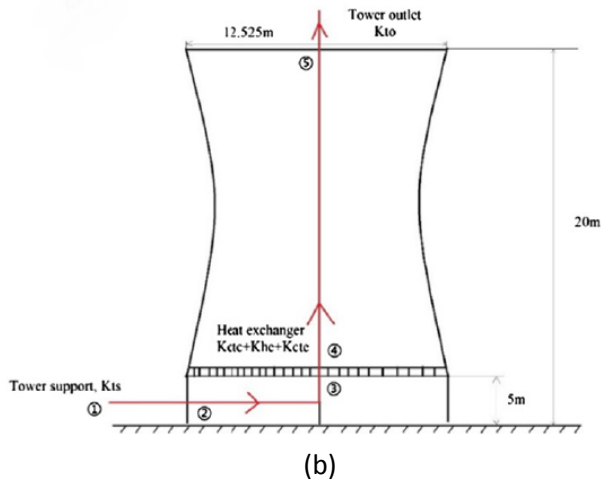
Proses pra-pendinginan pada menara pendingin NDDCT adalah proses penurunan temperatur udara yang akan masuk melalui inlet. Untuk melakukan proses ini, sistem menara akan ditambah dengan *spray cooling system* dengan nosel sebagai alat yang menyemburkan air dalam bentuk droplet yang sangat kecil atau sering disebut dengan droplet. Udara ambien merupakan inti dari proses pendinginan fluida panas yang masuk kedalam

NDDCT. Ketika terjadi kenaikan temperatur pada udara ambient atau yang disebut dengan *high ambient temperature*, proses pendinginan atau penurunan suhu akan terganggu karena jarak antara suhu tinggi dan rendah berkurang. Proses pra-pendinginan akan menjaga suhu udara ambient yang masuk melewati inlet NDDCT tetap stabil sehingga proses ini sangatlah penting ketika terjadinya *high ambient temperature*. Dalam keadaan normal tanpa adanya *crosswind*, UQ NDDCT mampu mengatasi panas 1,9 – 3,1 MW pada temperatur air yang masuk sebesar 70°C dengan temperatur ambien antara 15°C – 35°C [5]. Menara pendingin dapat bekerja dengan baik pada temperatur ambien 35°C, namun bila temperatur tersebut dapat diturunkan akan lebih baik.



(a)





**Gambar 2. 4** a) Bentuk asli menara UQ NDDCT dan b) sketsa proses pra-pendinginan. <sup>[6]</sup>

## 2.4 Fase Kontinyu

Aliran udara dimodelkan sebagai aliran yang tetap, mampat, bergejolak dan terus-menerus. Medan aliran udara digambarkan dengan persamaan konservasi Reynold-averged Navier Stokes (RANS) yang dikombinasikan dengan standar  $k-\epsilon$  untuk memperhitungkan efek turbulensi [2]

## 2.5 Fase Diskrit

Pada sistem kerja *sprayer*, air yang disuntikkan ke udara akan langsung berpecah saat keluar dari nosel mengikuti arah lintasan masing-masing. Untuk mensimulasikan semua droplet yang berpecah tersebut membutuhkan waktu dan sumber komputasi yang lebih. Maka dari itu, droplet tersebut di asumsikan dengan sebuah sel yang setara dengan keseluruhan droplet. Setiap sel berisi partikel yang identik dan sifat yang sama; yakni diameter, kecepatan, lintasan, suhu, dan sebagainya. Satu tetesan akan mewakili keseluruhan sel dengan asumsi semua tetesan dalam satu

sel memiliki karakteristik sama. Pada pemodelan lintasan droplet dengan kerangka Lagrangian, masing-masing butiran diskrit diamati secara terpisah di dalam aliran udara dengan integrasi persamaan gerak hukum Newton II dan pengaruh kekuatan yang relevan dengan udara. Untuk mewakili pertukaran massa, energy, dan momentum droplet dengan udara. Pertukaran tersebut dihitung dari kerangka Lagrangian melalui metode rata-rata volume dan kemudian digabungkan dengan persamaan RANS aliran Eulerian [5]. Untuk setiap sel komputasi, pertukaran rata-rata volume dihitung dengan mengumpulkan pengaruh jumlah droplet dalam sel komputasi

## **2.6 Lintasan Droplet**

Lintasan aliran fluida hasil dari semprotan nosel merupakan hubungan antara posisi droplet dengan kecepatannya. Hukum Newton II tentang gerak digunakan untuk memprediksi kecepatan butiran uap yang bergerak dalam aliran udara kontinyu. Gabungan dua arah antara udara dan droplet air berpengaruh pada perpindahan panas dan massa udara.

Gaya yang bekerja pada droplet tunggal ialah gaya gravitasi dan gaya tarik, dimana gaya tersebut mempengaruhi lintasan droplet saat bergerak di udara. Efek gaya tarik berlawanan arah dengan kecepatan relative antara droplet dan aliran udara. Gaya tarik tergantung pada bentuk dan ukuran droplet sedangkan kecepatan relatif bergantung pada udara, viskositas dan kepadatan udara tersebut [6].

## **2.7 Computational Fluid Dynamic (CFD)**

Komputasi dinamika fluida atau Computational Fluid Dynamics (CFD) merupakan suatu metode komputasi yang menggunakan metode numerik dan algoritma untuk menyelesaikan dan menganalisa aliran fluida, perpindahan panas, reaksi kimia,

dan fenomena-fenomena lain dengan menyelesaikan persamaan matematika. CFD dapat menyelesaikan permasalahan yang didasarkan pada termodinamika dan mekanika fluida. Pada umumnya, ada tiga tahap dalam melakukan simulasi dengan CFD yaitu :

*a. Preprocessing*

*Preprocessing* merupakan tahapan pertama untuk membangun dan menganalisis sebuah model CFD, yaitu dengan melakukan penggambaran geometri model, membuat mesh untuk membagi daerah komputasi menjadi sejumlah grid yang sesuai, menentukan parameter fisis dari kondisi batas model dan sifat-sifat fluidanya.

*b. Processing atau solving*

*Solving* merupakan tahapan untuk menghitung kondisi-kondisi yang telah diterapkan pada saat *preprocessing*. Pada proses *solving*, perhitungan dilakukan dengan cara pendekatan numerik seperti elemen hingga, beda hingga serta volume hingga. Pada proses *solving* akan dilakukan iterasi hingga semua data yang dimasukkan dapat terhitung dan mencapai kondisi konvergen.

*c. Postprocessing*

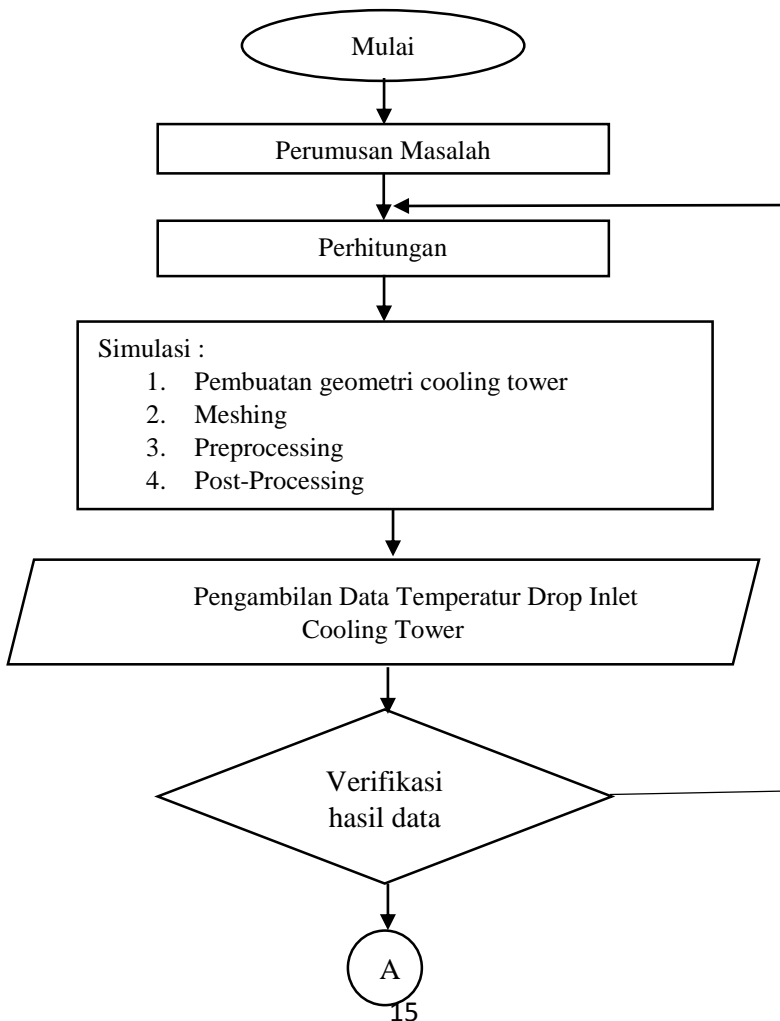
*Postprocessing* merupakan langkah terakhir dalam simulasi CFD yaitu mengorganisasi dan menginterpretasikan data hasil simulasi CFD yang berupa kontur gambar, plot grafik dan animasi. Visualisasi yang ditambahkan ialah kontur (*contour*) yang merupakan pola dari nilai parameter fisis yang dimulasikan seperti temperature, tekanan dan *velocity*. Kedua adalah vektor (vector) yang merupakan arah dari besaran seperti vektor kecepatan. Ketiga adalah bentuk aliran (streamline) yang merupakan pergerakan kontinyu fluida yang bergerak sepanjang ruang. Keempat adalah particle track yang merupakan lintasan partikel hasil diskritisasi.

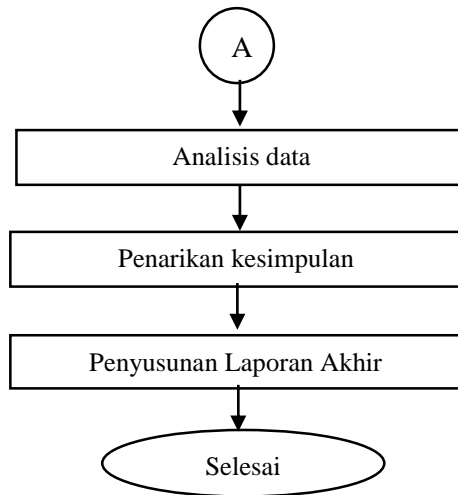
*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## BAB III METODOLOGI PENELITIAN

### 3.1 Diagram Alir Penelitian

Secara umum tahapan penelitian tugas akhir ini dapat digambarkan dalam diagram alir seperti gambar 3.1 dibawah ini.





**Gambar 3. 1** Skema diagram alir penelitian tugas akhir

Penelitian tugas akhir ini diawali dengan studi literatur yang dilakukan dengan memahami konsep dan dasar penelitian tugas akhir. Studi literatur dilakukan dengan mempelajari jurnal acuan yakni penelitian Yubiao Sun *et al.*, Xiaoxiao Li *et al.*, dan buku yang berkaitan dengan penelitian. Adapun yang dipelajari dari studi literatur ini adalah termodinamika, mekanika fluida, perpindahan panas dan massa, proses pra-pendinginan, nosel, dan droplet. Setelah melakukan studi literatur, penelitian dilakukan dengan simulasi menggunakan software ANSYS. Proses ini diawali dengan pembuatan menara pendingin NDDCT beserta komponen *spray cooling system* didalamnya, *meshing*, *pre-processing*, dan *post-processing*.

Penelitian ini akan mensimulasikan pengaruh *massflowrate* nosel terhadap penurunan suhu (*temperature drop*) pada bagian radiator menara pendingin. *Temperature drop* adalah penurunan

suhu ambien akibat adanya perpindahan panas secara konveksi dari udara bersuhu tinggi dengan air (droplet) yang suhunya lebih rendah. Pembuatan geometri UQ NDDCT dilakukan dengan menggunakan *design modeler*. Geometri NDDCT dibuat sesuai bentuk asli dan acuan jurnal, dan hanya dibuat seperempat bagian sama dengan asumsi *simetry*. Selanjutnya dilakukan proses *meshing* pada geometri. Proses *meshing* akan membagi geometri menjadi bagian-bagian kecil yang biasa disebut sebagai control volume. Berbagai persamaan matematis dalam CFD seperti kekekalan energy, kekekalan momentum, kekekalan massa dan sebagainya, akan digunakan untuk melakukan perhitungan pada tiap-tiap control volume. Setelah proses *meshing* dilakukan, penelitian melangkah ke proses *pre-processing*. Pada proses ini dilakukan *setup* untuk menentukan kondisi batas pada kasus yang disimulasikan. Pemilihan kondisi batas didasarkan jurnal acuan. Setelah proses *pre-processing* dilakukan, penelitian melangkah ke proses *post-processing*. Hasil dari *post-processing* divalidasi dengan hasil data pada jurnal. Validasi dilakukan dengan membandingkan hasil penurunan suhu dengan penelitian yang dilakukan sebelumnya dengan menggunakan parameter yang sama. Bila hasil dari validasi tersebut sesuai dengan data dari jurnal acuan, maka desain geometri dapat digunakan untuk penelitian dengan variasi nilai *massflowrate*.

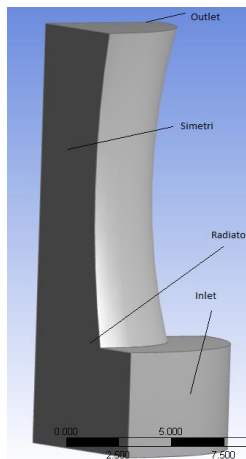
### **3.2 Pembuatan Geometri**

Pembuatan geometri dilakukan dengan menggunakan Design Modeler Fluent pada ANSYS. Geometri yang dibuat tidak sama persis dengan bangunan asli. Karena bangunan NDDCT berbentuk lingkaran (tampak atas), maka pembuatan geometri hanya seperempat bagian saja dengan catatan menggunakan asumsi *simetry* dan hal yang berlaku pada objek penelitian berlaku juga pada bagian simetris lainnya. Ada 3 bagian pada geometri

NDDCT ini yakni bagian saluran masuk udara, bagian daerah pra-pendinginan, dan bagian menara. Bagian saluran masuk udara merupakan bagian inlet udara ambien untuk objek penelitian. Radiator terletak diantara bagian daerah pra-pendinginan dan bagian menara. Penelitian ini akan menganalisa pengaruh droplet pada perubahan suhu pada bagian radiator sehingga bagian daerah pra-pendinginan dan radiator merupakan fokus utama. Adapun spesifikasi geometri NDDCT ialah sebagai berikut :

**Tabel 3. 1** Spesifikasi geometri NDDCT.

No	Besaran	Nilai
1	Tinggi Menara Keseluruhan	20 m
2	Jari-jari Menara	6,2625 m
3	Tinggi Daerah Pra-pendinginan	5 m
4	Panjang Saluran Inlet	3 m



**Gambar 3. 2** Geometri UQ NDDCT.



### 3.3 Meshing

Setelah pembuatan geometri dilakukan, maka tahap selanjutnya adalah *meshing*. *Meshing* merupakan proses pemotongan bagian dominan menjadi bagian yang lebih kecil. Bagian tersebut dianggap sebagai persamaan tempat dilakukannya perhitungan matematik. Banyak parameter yang menunjukkan kualitas *meshing*. Parameter tersebut antara lain *skewness*, *aspect ratio*, dan *orthogonality*. Ukuran *meshing* akan mempengaruhi akurasi dari perhitungan. Semakin kecil ukuran *meshing* maka akurasi yang diperoleh lebih baik namun membutuhkan komputasi yang lebih tinggi sehingga membutuhkan computer dengan komputasi sangat baik. Selain ukuran *meshing*, jenis *meshing* juga mempengaruhi akurasi dari hasil simulasi. Spesifikasi mesh dapat dilihat pada tabel dibawah :

**Tabel 3. 2** Spesifikasi meshing.

Definition	
Suppressed	No
Coordinate System	Default Coordinate System
Behavior	None
Reference Frame	Lagrangian
Material	
Fluid/Solid	Defined By Geometry (Fluid)
Bounding Box	
Length X	9.2625 m
Length Y	9.2625 m
Length Z	20. m
Properties	
Volume	711.02 m <sup>3</sup>
Centroid X	-3.1193 m
Centroid Y	3.1193 m
Centroid Z	7.7746 m
Statistics	
Nodes	42200
Elements	229852
Mesh Metric	Skewness
Min	1.67231075876018E-06
Max	0.798847572863796
Average	0.213103112485001
Standard Deviation	0.118248637738257



**Gambar 3. 3** Hasil meshing geometri.

### 3.4 *Pre-processing*

Pada langkah ini dilakukan pengaturan (*setup*) untuk menentukan kondisi batas simulasi. Pemilihan kondisi batas dilakukan dengan kondisi benda dan lingkungan sebenarnya agar didapatkan hasil simulasi yang sesuai. Pembuatan kondisi batas dilakukan untuk memudahkan tahap *processing* dan *solving* ketika melakukan proses inialisasi kondisi. Kondisi batas pada simulasi ini adalah sebagai berikut :

**Tabel 3. 3** Kondisi batas geometri pada simulasi

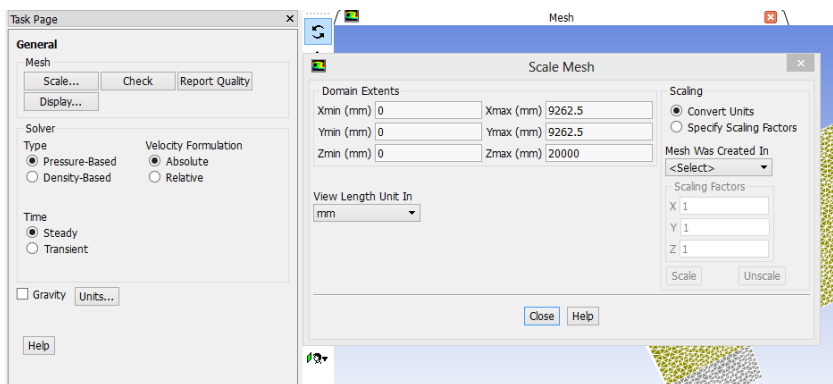
No.	Nama Bagian	Kondisi Batas	Inisial Batas
1	Saluran masuk	Saluran masuk	<i>Inlet</i>
2	Dinding luar	Wall	<i>Wall</i>
3	Dinding atas	Saluran keluar	<i>Outflow</i>

4	<i>Ground</i>	Wall	<i>Wall</i>
5	Dinding dalam	Simetry	<i>Simetry</i>
6	Radiator	Interior	<i>Interior</i>

Solving merupakan proses perhitungan data input model geometri hingga mencapai batas nilai *error* yang telah ditentukan. Perhitungan dilakukan berdasarkan kondisi batas yang telah ditentukan pada kondisi *pre-processing*. Pada simulasi solving, perhitungan dianggap selesai atau konvergen ketika nilai yang dihasilkan sudah mencapai  $10^{-4}$ .

### 3.4.1 General

Pada kotak dialog *general* terdapat dua sub-menu yakni *mesh* dan *solver*. Pada bagian *mesh* dipilih bagian *scale* untuk mengubah dimensi menjadi mm karena kondisi pembuatan geometri menggunakan millimeter. Sedangkan pada bagian *solver* dipilih tipe *pressure based* karena sangat cocok untuk kasus dengan penelitian menggunakan udara berkecepatan. Dan pada bagian *time* dipilih *steady* karena penelitian tidak melihat perubahan kondisi berdasarkan waktu.



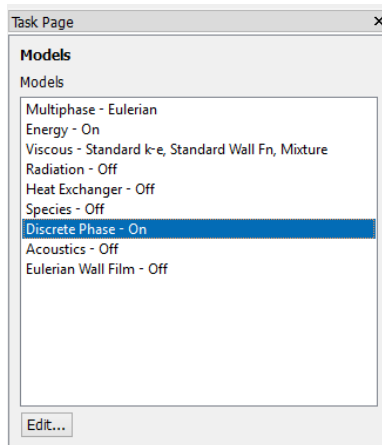
**Gambar 3. 4** Setup pada bagian general.

### 3.4.2 Models

Model adalah bagian untuk menyatakan kondisi yang dipakai untuk mendapatkan solusi melalui persamaan matematis. Pada sub-menu multiphase, dipilih solusi eulerian karena solusi ini memungkinkan perhitungan pada interaksi udara dengan fase kontiniu dengan air dalam bentuk droplet. Kemudian sub-menu energy diaktifkan untuk menyelesaikan perhitungan termal. Lalu sub-menu viscous dipilih jenis standar k-epsilon untuk menghitung turbulensi dari udara yang mengalir terus menerus. Kemudian sub-menu discrete phase diaktifkan dan pada menu inilah injeksi nosel diatur. Spesifikasi injeksi nosel adalah sebagai berikut :

**Tabel 3. 4** Spesifikasi injeksi droplet pada simulasi.

No.	Varibel	Nilai
1	x-position	4,6315 m
2	y-position	4,6315 m
3	z-position	1m; 2m; 3m; 4m; 4,8m
4	x-velocity	14,14 m/s
5	y-velocity	14,14 m/s
6	z-velocity	0 m/s
7	Diameter	$68 \times 10^{-6}$ m
8	Temperatur	301 K
9	Flowrate	0,005 kg/s (untuk validasi design)



**Gambar 3. 5** Setup pada bagian model.

### 3.4.3 Material

Material yang digunakan dalam simulasi ini ialah udara yang juga sebagai fluida kerja. *Setup* material menggunakan pengaturan standar. *Inert particle* akan muncul secara otomatis setelah sub-menu *discrete phase* diaktifkan dan injeksi droplet dibuat dalam simulasi. Fluida yang digunakan pada *inert particle* adalah air dengan spesifikasi *default*.

### 3.4.4 Boundary Condition

Kondisi pada simulasi diatur sedekat mungkin dengan kondisi lapangan yang sebenarnya. Pada kasus ini, kondisi lapangan diketahui dari jurnal Xiaoxiao Li *et al.* tentang UQ NDDCT. Pengaturan kondisi batas pada NDDCT yang digunakan ialah *gauge pressure* sebesar 101.325 Pa dengan *turbulence intensity* sebesar 1% pada udara inlet. Temperature udara inlet diatur sebesar 311K dengan *velocity* untuk X sebesar 0,58 m/s, Y sebesar 0,58 m/s, dan Z sebesar 0 m/s. *Velocity* X dan Y merupakan

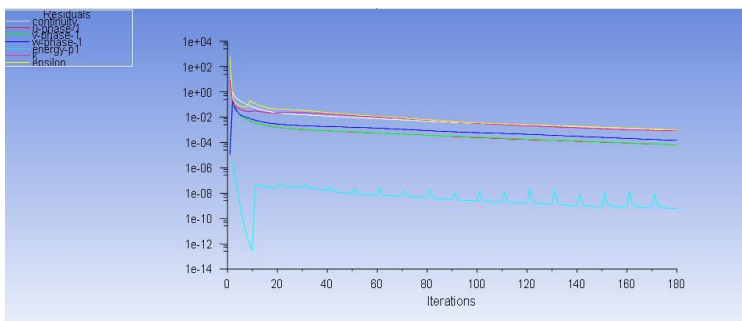
hasil perhitungan untuk mendapatkan *velocity* total sebesar 0,8 m/s pada inlet NDDCT.

### 3.4.5 Solution

Tahap terakhir pada penentuan kondisi ialah solution untuk menentukan solusi sesuai dengan tujuan yang ingin dicapai. Pada kotak dialog monitor, pilih residual, plot diaktifkan dan nilai RMS yang digunakan sebesar  $10^{-4}$ . Pada menu *solution initialization*, dipilih *standart initialization* pada *initialization methods* karena perhitungan akan dimulai dari inlet. Maka pada kotak *compute from* dipilih inlet. Kemudian pada *number iteration* dipilih 500 iterasi dengan *reporting interval* 1 dan *profile update interval* sebesar 1.

### 3.5 Post-processing

Post-processing merupakan proses terakhir dalam simulasi. Proses ini dicapai bila hasil simulasi sudah konvergen atau semua dinilai perhitungan RMS berada pada nilai  $10^{-4}$ . Pada tahap ini dilakukan pengambilan data dan visualisasi hasil simulasi meliputi kontur temperature, tekanan, dan *velocity* udara.



**Gambar 3. 6** Hasil perhitungan yang sudah konvergen menggunakan Fluent

## BAB IV

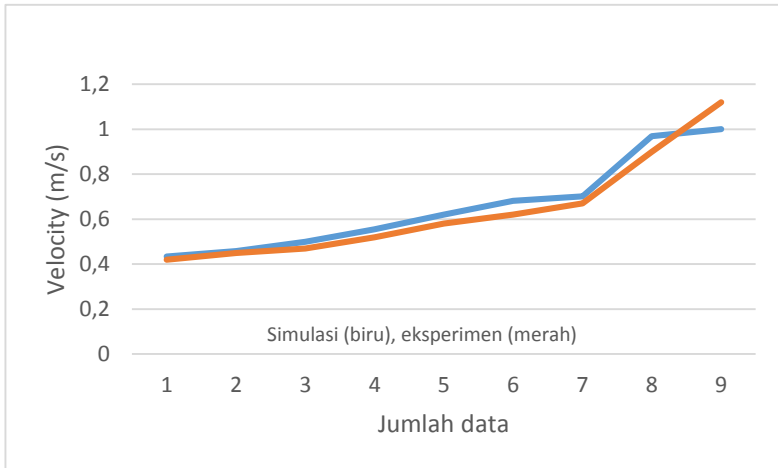
### ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

#### 4.1 Validasi Desain Simulasi

Validasi merupakan hal penting dari sebuah penelitian berbasis simulasi. Validasi menjadi parameter kesesuaian uji coba dengan kondisi acuan yang dituju. Maka dari itu, proses ini penting untuk menyesuaikan apakah simulasi sudah benar dan bias dilanjut ketahap selanjutnya atau tidak. Proses validasi ini membandingkan hasil *velocity* NDDCT dan *temperature drop* pada bagian radiator yang diperoleh dari simulasi dengan hasil penelitian yang dilakukan sebelumnya. Berikut perbandingan *velocity* hasil simulasi dengan penelitian sebelumnya:

**Tabel 4. 1** Validasi simulasi berdasarkan *velocity*.

Tinggi Titik Pengukuran (meter)	Nilai <i>velocity</i> (m/s)		Error (%)
	Simulasi	Penelitian yang sudah dilakukan	
1	0,43337	0,42	3,183
1,5	0,45775	0,45	1,722
2	0,50001	0,47	6,383
2,5	0,55441	0,52	6,617
3	0,62081	0,58	6,896
3,5	0,68111	0,62	9,856
4	0,70113	0,67	4,626
4,5	0,96961	0,90	7,666
4,75	1	1,12	10,7
Error Rata-rata			6,405



**Gambar 4. 1** Grafik perbandingan *velocity*.

Pada sepuluh titik yang diambil data *velocity* didapatkan error dari masing masing sebesar 3,183%; 1,722%; 6,383%; 6,617%; 6,896%; 9,856%; 4,626%; 7,666%; 10,7% sehingga diperoleh dinilai rata-rata error dari keseluruhan model simulasi sebesar 6,405%. Nilai error ini besarnya kurang dari 10% yang menunjukkan bahwa kondisi batas yang digunakan dalam simulasi sudah mendekati dengan kondisi pada pengukuran pada penelitian yang sudah pernah dilakukan oleh Xiaoxiao Li pada menara UQ NDDCT. Nilai error yang berada dibawah 10% sudah dapat dianggap valid dalam sebuah penelitian dan model simulasi dapat digunakan untuk tahap selanjutnya. Pada penelitian ini juga dilakukan validasi *temperature drop* antara simulasi dengan hasil penelitian Yubiao Sun dkk. Hal ini dilakukan karena parameter kondisi nosel yang digunakan pada penelitian ini mengacu pada penelitian yang dilakukan yang dilakukan Yubiao Sun. Berikut



perbandinga *temperature drop* hasil simulasi dengan penelitian Yubiao Sun dkk. :

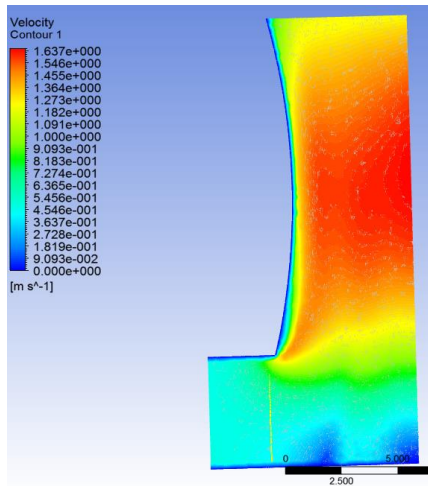
**Tabel 4. 2** Validasi simulasi berdasarkan *temperature drop*

Tinggi Nosel (m)	<i>Temperature Drop</i> (°C)		Error (%)
	Simulasi	Acuan	
1	0,86	Tidak ada data	-
2	1,02	Tidak ada data	-
3	1,31	1.25	4,8
4	1,40	1.32	6,06
4,8	1.43	1.31	9,16
Error rata-rata			6,67

Pada kasus *temperature drop*, nosel H = 1 meter dan H = 2 meter dengan parameter yang sama dengan nosel lainnya dan pemasangan nosel yang tegak lurus dengan tiang penyangga, memiliki pengaruh yang lebih kecil terhadap suhu radiator dibandingkan dengan nosel dengan posisi yang lebih tinggi. Yubiao Sun dalam penelitiannya mengatakan nosel dengan H = 1 meter dan H = 2 meter memiliki pengaruh yang kecil sehingga pada hasil penelitiannya tidak memberikan data *temperature drop* dengan sudut pemasangan tegak lurus dengan tiang penyangga. Namun hasil dari nosel dengan H = 3 meter; H = 4 meter; dan H = 4,8 meter; menunjukkan hasil dengan error secara berurutan sebesar 4,8%; 6,06%; 9,16%. Karena nosel pada ketinggian satu meter dan dua meter tidak dapat dibandingkan, maka nilai rata-rata error pada *temperature drop* diambil dari tiga data saja yakni sebesar 6,67%. Nilai error ini berada dibawah 10% sehingga data ini dapat dianggap valid. Dengan dua jenis validasi ini, maka penggunaan model pada simulasi dapat dipertanggungjawabkan dan data yang diperoleh pada tahap selanjutnya dapat dikategorikan akurat.

#### 4.2 Velocity Udara Inlet

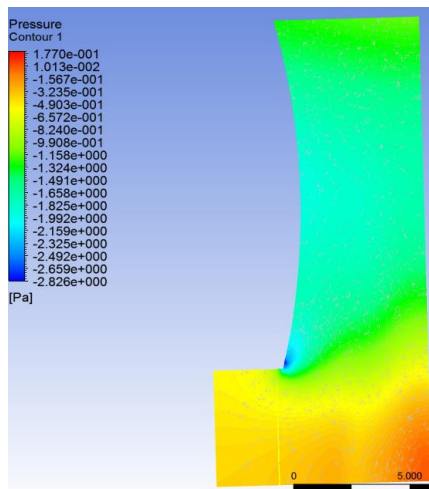
Pada model simulasi yang digunakan dalam CFD, yang ditunjukkan pada gambar 4.2, geometri yang digunakan hanyalah seperempat ( $90^\circ$ ) bagian dari keseluruhan. Bagian yang simetris ini menjadikan penelitian dapat dilakukan pada seperempat bagian saja dengan asumsi hal yang sama terjadi pada tiga bagian lainnya. Udara ambien merupakan bagian penting dalam proses pendinginan *Natural Draft Dry Cooling Tower*. Hal tersebut dapat dibuktikan dengan menara simulasi dengan tinggi 20 meter dan diameter 12,525 meter.



**Gambar 4. 2** *Velocity* pada simulasi UQ NDDCT.

Udara yang masuk kedalam menara pendingin berada pada kecepatan 0,43 m/s pada ketinggian 1 meter; 0,62 m/s pada ketinggian 3 meter dan 1 m/s pada ketinggian 4,75 meter. Ini menunjukkan bahwa semakin tinggi posisinya maka kecepatan udara juga semakin besar. Hal ini disebabkan oleh *velocity-z* pada ketinggian 5 meter lebih besar dari pada ketinggian 1 meter.

*Velocity-z* merupakan kecepatan udara pada sumbu Z yang diakibatkan oleh udara yang masuk dari segala arah pada CT bertemu pada satu titik pusat yang mengakibatkan tekanan yang semakin besar. Tekanan pada bagian atas CT lebih rendah daripada bagian bawah sehingga udara bergerak keatas seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.3.

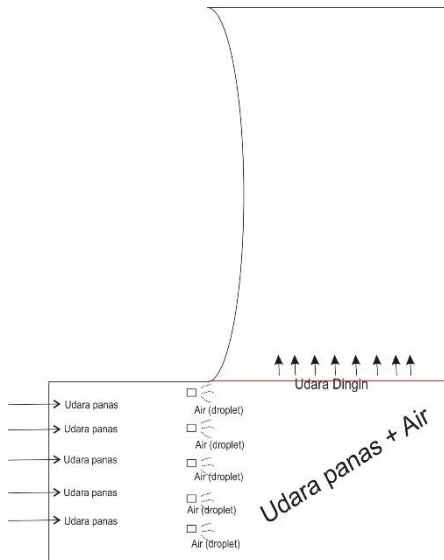


**Gambar 4. 3** Persebaran tekanan pada NDDCT.

Prinsip ini akan digunakan pada proses pra-pendinginan. Nosel (*spray cooling system*) akan menyemburkan air dalam bentuk droplet. Droplet yang memiliki suhu lebih rendah akan berinteraksi dengan udara yang memiliki suhu yang lebih tinggi sehingga terjadi penurunan suhu. Udara dengan suhu yang lebih rendah akan bergerak menuju radiator. Hal inilah yang disebut dengan proses pra-pendinginan.

### 4.3 Pengaruh *Massflowrate*

Penggunaan *spray cooling system* dilakukan untuk mengatasi adanya *high ambient temperature* yang terjadi pada menara pendingin *Natural Draft Dry Cooling Tower*. Pada kasus yang menggunakan UQ NDDCT sebagai bahan uji, performa terbaik diperoleh ketika suhu ambien berada pada rentang 15°C – 35°C. Untuk memperoleh performa tersebut, temperature drop harus mencapai nilai minimal 3°C. Maka dari itu dilakukan peningkatan nilai *massflowrate* pada *spray cooling system* dengan melakukan pendekatan kesetimbangan laju aliran massa seperti pada persamaan (4). Analogi pendekatan tersebut seperti pada gambar 4.4. Hasil dari pendekatan tersebut diperoleh sebagai berikut.



**Gambar 4. 4** Analogi pendekatan kesetimbangan laju aliran massa.

**Tabel 4. 3** Nilai pendekatan kesetimbangan laju aliran massa.

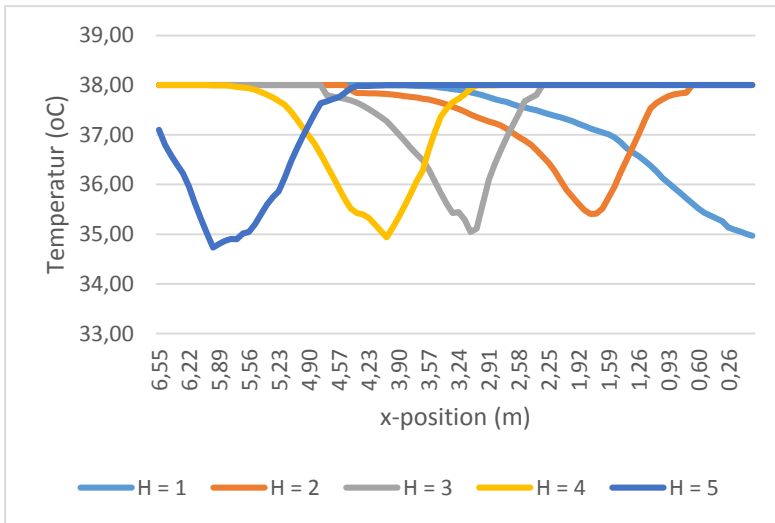
Besaran	Nilai
$\dot{m}_1$	0,003 kg/s
$T_1$	38°C
$\dot{m}_2$	0,00101 kg/s
$T_2$	28°C
$T_{out}$	35°C
$h_1$	38,228 kJ/kg
$h_2$	117,39 kJ/kg
$h_3$	99,345 kJ/kg

Pada tabel diatas, diketahui bahwa untuk mencapai performa menara pendingin UQ NDDCT, yang membutuhkan suhu ambien maksimal yaitu 35°C, dibutuhkan *spray cooling system* dengan nilai *massflowrate* sebesar 10,1 g/s. Besar nilai *massflowrate* ini berlaku untuk nosel dengan jarak yang paling dekat dengan radiator. Nosel tersebut merupakan nosel H = 4,8 meter yang memiliki jarak sangat dekat yakni 0,2 meter. Maka untuk mendapatkan *temperature drop* sebesar 3°C dilakukan variasi pada *massflowrate* berdasarkan jarak nosel dengan radiator menggunakan persamaan (5). Variasi tersebut dinyatakan seperti pada tabel 4.5 berikut.

**Tabel 4. 4** Variasi *massflowrate* nosel terhadap jarak dengan radiator.

Tinggi nosel	Jarak	<i>Massflowrate</i>
4,8 meter	0,2 meter	10,16 g/s
4 meter	1 meter	12,62 g/s
3 meter	2 meter	15,78 g/s
2 meter	3 meter	19,72 g/s
1 meter	4 meter	24,65 g/s

Nilai *massflowrate* pada nosel H = 4,8 meter sebesar 10,16 g/s sedangkan *massflowrate* pada nosel H = 1 meter adalah sebesar 24,65g/s. Hal ini terjadi karena jarak nosel H = 1 meter lebih jauh daripada nosel yang lainnya sehingga dibutuhkan *massflowrate* yang lebih besar. Pengaruh *massflowrate* terhadap *temperature drop* pada simulasi berdasarkan nilai yang diperoleh dari perhitungan ialah sebagai berikut :



**Gambar 4. 5** Grafik temperature setelah diberlakukan variasi *massflowrate*.

Pada pengukuran *temperature drop*, ada perbedaan nilai hasil yang simulasi dengan hasil yang diharapkan dari perhitungan. Perbedaan tersebut dapat dilihat pada tabel dibawah ini :

**Tabel 4. 5** Perbedaan nilai *temperature drop* hasil perhitungan dengan simulasi.

Ketinggian Nosel	<i>Temperature drop</i> perhitungan	<i>Temperature drop</i> simulasi	Error (%)
4,8 meter	3°C	3,27 °C	9,8
4 meter	3°C	3,06 °C	2,0
3 meter	3°C	2,95 °C	1,5
2 meter	3°C	2,60 °C	13,4
1 meter	3°C	3,03 °C	0,9
Error Total			5,4

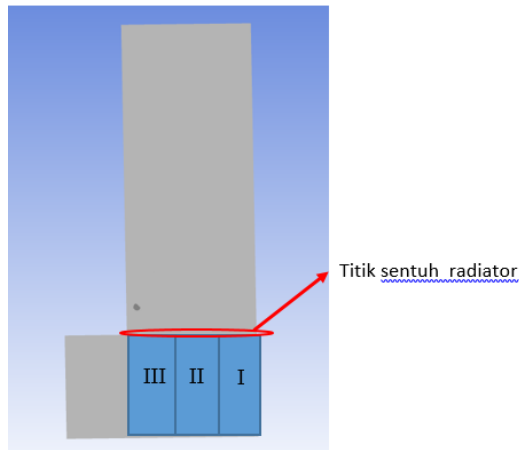
Perbandingan nilai simulasi dengan perhitungan memiliki error sebesar 5,4%. Data hasil penelitian dapat dikatakan valid dan hasil penelitian dapat digunakan bila nilai error berada dibawah 10%. Oleh karena itu, perhitungan variasi *massflowrate spray cooling system* yang menyebabkan *temperature drop* pada udara ambien radiator dapat dikatakan valid.

#### **4.4 Pengaruh Posisi Spray Cooling System**

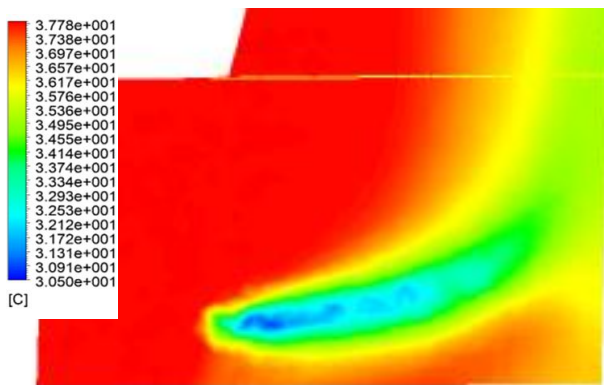
Posisi nosel memberikan dampak besar pada performa pra-pendinginan. Nosel dengan posisi lebih tinggi dan dekat dengan radiator jelas memiliki pengaruh yang besar pada pendinginan. Sedangkan nosel yang posisinya jauh dari radiator menjadi tidak diuntungkan seperti yang terjadi pada nosel pada ketinggian satu meter dan dua meter. Hal ini memanglah kekurangan dari pemasangan nosel yang permanen tegak lurus dengan tiang penyangga.

Dengan *massflowrate* 5 g/s dan diameter droplet  $6,8 \times 10^{-5}$ , nosel dengan ketinggian berbeda memiliki pengaruh yang berbeda pula. Salah satu pengaruh tersebut terletak pada titik sentuh radiator. Nosel dengan ketinggian satu meter memiliki jarak terjauh dengan titik sentuh radiator. Jarak yang tersebut

menyebabkan udara dingin hasil interaksi droplet dengan udara panas berinteraksi dengan udara panas lainnya yang menyebabkan nilai *temperature drop*-nya kecil. Walaupun demikian, proses interaksi yang lebih banyak akan mempengaruhi daerah yang lebih luas. Hal ini dapat kita lihat pada gambar 4.5



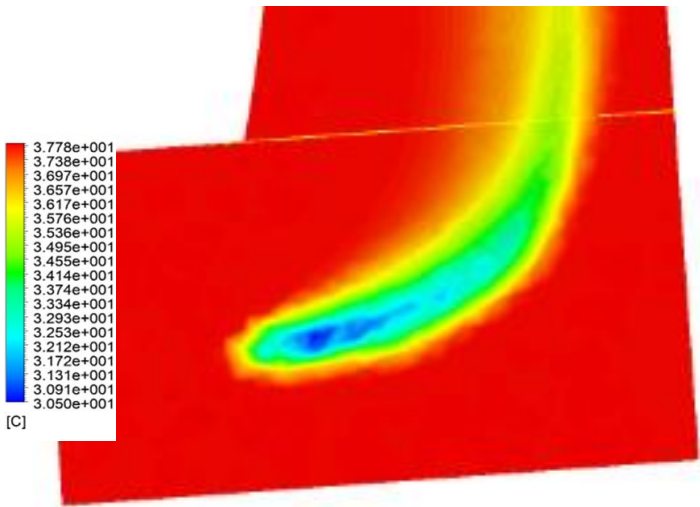
**Gambar 4. 6** Sketsa daerah titik sentuh radiator.



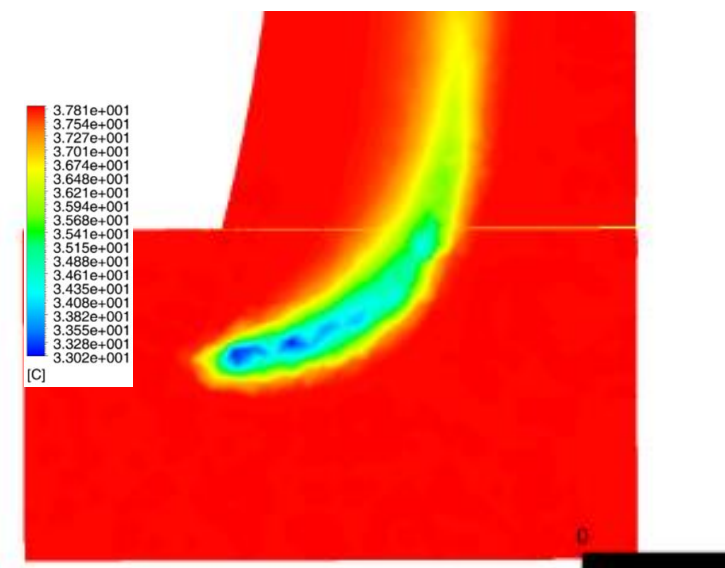
**Gambar 4. 7** Profil temperatur nosel H = 1 meter.



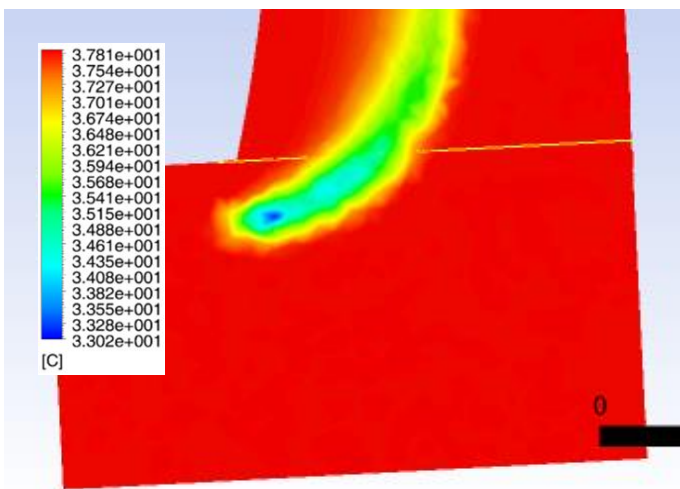
Dari kontur pada gambar diatas, dapat diamati bahwa nosel H = 1 meter berpengaruh pada titik sentuh radiator daerah I. Nosel H = 2 meter berpengaruh pada titik sentuh radiator daerah I dan II. Nosel H = 3 meter akan lebih berkontribusi pada titik sentuh radiator di daerah II. Hal ini diperlihatkan dengan perbedaan warna kontur. Perbedaan warna kontur akibat perubahan suhu oleh nosel H = 3 meter menutupi seluruh titik sentuh radiator daerah II. Nosel H = 4 meter, berkontribusi dalam *temperature drop* pada daerah II dan III. Hal ini ditunjukkan dengan warna kontur yang berbeda dengan sekitarnya. Pada titik sentuh radiator, warna kontur pada nosel H = 4 meter lebih cerah dari pada nosel H = 3 meter yang menunjukkan *temperature drop*-nya lebih besar. Nosel H = 4,8 meter berkontribusi pada titik sentuh radiator daerah III.



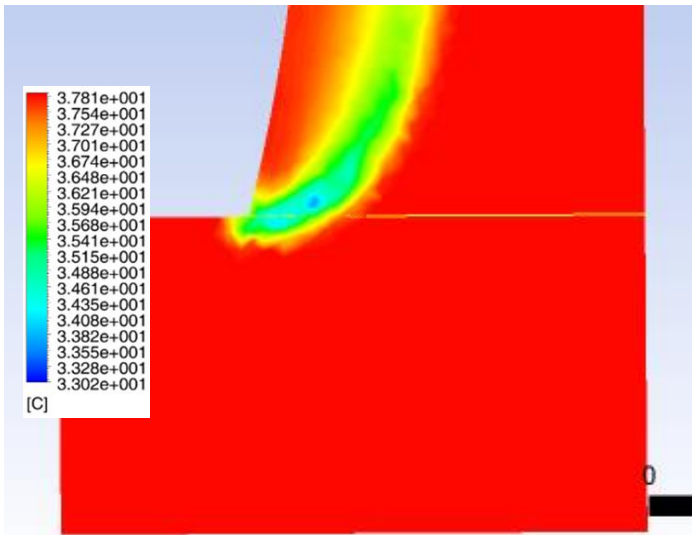
**Gambar 4. 8** Profil temperatur nosel H = 2 meter.



Gambar 4. 9 Profil temperatur nosel H = 3 meter.



Gambar 4. 10 Profil temperatur nosel H = 4 meter.



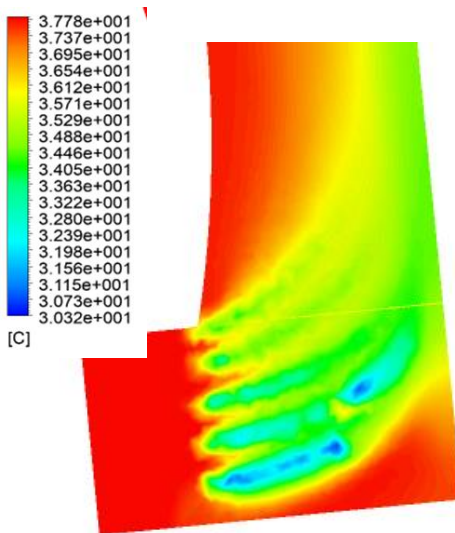
**Gambar 4. 11** Profil temperatur nosel H = 4,8 meter.

**Tabel 4. 6** Daerah titik sentuh radiator dipengaruhi oleh nosel

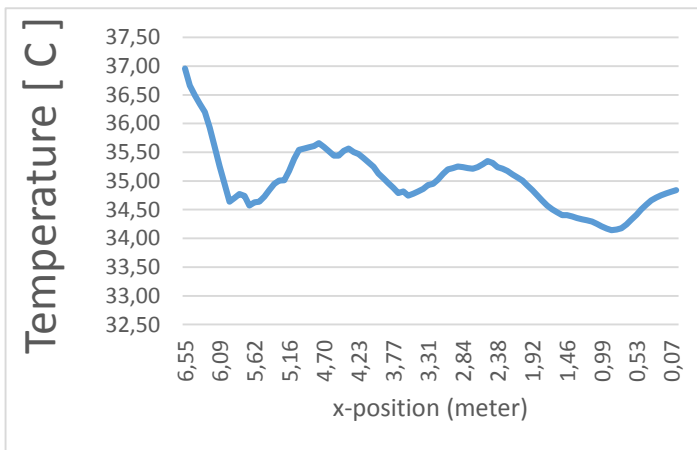
Tinggi Nosel (H)	Daerah yang diperngaruhi
1 meter	I dan II
2 meter	I dan II
3 meter	II
4 meter	II dan III
4,8 meter	III

#### 4.5 Aplikasi

Pada aplikasi dilapangan, penggunaan *spray cooling system* tidak dilakukan secara individual tetapi secara bersamaan. Artinya nosel yang dipasang haruslah digunakan. Maka dari itu dilakukan simulasi dengan menggunakan semua nosel yang terpasang (5 nosel) secara bersamaan guna melihat *temperature drop*.



**Gambar 4. 12** Profil temperatur penggunaan 5 nosel secara bersamaan dengan variasi *massflowrate*.



**Gambar 4. 13** Grafik temperatur penggunaan 5 nosel secara bersamaan dengan variasi *massflowrate*.

Profil temperatur dapat dilihat pada gambar 4.12 dan grafik temperatur dapat dilihat pada gambar 4.13. Dengan menggunakan 5 nosel secara bersamaan, dengan ketinggian dan *massflowrate* yang sama dengan hasil perhitungan, didapatkan nilai rata-rata *temperature drop* sebesar 3,06°C. Hasil tersebut sudah sesuai dengan set point yang dibutuhkan oleh menara pendingin untuk dapat bekerja dengan optimal.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## **BAB V**

### **PENUTUP**

#### **5.1 Kesimpulan**

Berdasarkan perhitungan, simulasi ,dan analisa data yang telah dilakukan, maka kesimpulan pokok yang diambil dari tugas akhir ini adalah dalam keadaan *high ambient temperature*, penambahan *massflowrate* pada *spray cooling system* akan menyebabkan peningkatan *temperature drop*. Variasi *massflowrate* dilakukan agar nosel dengan ketinggian yang berbeda mendapatkan *temperature drop* yang sama. Besar nilai *massflowrate* untuk nosel H = 4,8 meter; 4 meter; 3 meter; 2 meter; 1 meter secara berurutan adalah 10,16 g/s; 12,62 g/s; 15,78g/s; 19,65 g/s; 24,65 g/s. Error dari nilai perhitungan yang disimulasikan ialah sebesar 5,4%. Dengan menggunakan 5 nosel dengan parameter yang sama diperoleh nilai rata – rata *temperature drop* sebesar 3,06 g/s.

#### **5.2 Saran**

Penelitian yang dilakukan oleh para ahli tentang topik ini tidaklah banyak sehingga data yang diperoleh sebagai pembandingan sangatlah terbatas. Maka dari itu, untuk memperbanyak data pembandingan, dilakukan pengukuran langsung sehingga data hasil perhitungan dan simulasi lebih akurat dan valid.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*



## DAFTAR PUSTAKA

- [1] D. G. Korger, "Air-Cooled Heat Exchanger and Cooling Tower," Tulsa, Pennwell Corp, 2004.
- [2] Z. G. H. G. K. H. X. L. 1. Yubiao Sun, "Investigation on the influence of injection direction on the spray cooling performance in natural draft dry cooling tower," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 110, pp. 113-131, 2017.
- [3] gc3.com, "<http://gc3.com/gc3-technical-manual-cooling-water/>," 2015. [Online]. Available: <http://gc3.com/gc3-technical-manual-cooling-water/>. [Accessed 20 05 2018].
- [4] Y. A. P. M. Department, "www.yokogawa.com," Yokogawa, 2016. [Online]. Available: <https://www.yokogawa.com/id/library/resources/application-notes/cooling-tower/>. [Accessed 20 05 2018].
- [5] X. L. e. al, "Simulation of UQ Galton Natural Draft Dry Cooling Tower," *Applied Thermal Engineering*, 2016.
- [6] h. G. G. G. L. k. H. Yubio Su, "A Study on multi-nozzle arrangement for spray cooling system in natural draft dry cooling system," in *applied Thermal Engineering*, 2017.
- [7] Listrik.org, "Listrik.org," PLN, 31 March 2017. [Online]. Available: <http://listrik.org/pln/program-35000-mw/>. [Accessed 19 January 2018].
- [8] S. D. Launder BE, "Lectures in Mathematical Models of Turbulance," *Academic*, 1972.

**LAMPIRAN**

Diameter Cooling Tower (meter)	Temperatur (°C) terhadap Posisi Ketinggian Nosel				
	H = 4,8 meter	H = 4 meter	H = 3 meter	H = 2 meter	H = 1 meter
6,55	311,00	311,00	311,00	311,00	311,00
6,48	311,00	311,00	311,00	311,00	311,00
6,42	310,99	311,00	311,00	311,00	311,00
6,35	310,98	311,00	311,00	311,00	311,00
6,29	310,92	311,00	311,00	311,00	311,00
6,22	310,82	311,00	311,00	311,00	311,00
6,15	310,72	311,00	311,00	311,00	311,00
6,09	310,54	311,00	311,00	311,00	311,00
6,02	310,31	311,00	311,00	311,00	311,00
5,95	310,12	311,00	311,00	311,00	311,00
5,89	309,85	311,00	311,00	311,00	311,00
5,82	309,57	311,00	311,00	311,00	311,00
5,76	309,16	311,00	311,00	311,00	311,00
5,69	308,50	311,00	311,00	311,00	311,00
5,62	307,67	311,00	311,00	311,00	311,00
5,56	307,66	311,00	311,00	311,00	311,00
5,49	307,89	311,00	311,00	311,00	311,00
5,43	307,78	310,99	311,00	311,00	311,00
5,36	307,90	310,99	311,00	311,00	311,00
5,29	308,04	310,99	311,00	311,00	311,00
5,23	308,07	310,97	311,00	311,00	311,00
5,16	308,07	310,96	311,00	311,00	311,00
5,09	308,14	310,93	311,00	311,00	311,00

5,03	308,21	310,91	311,00	311,00	311,00
4,96	308,45	310,86	311,00	311,00	311,00
4,90	308,81	310,79	311,00	311,00	311,00
4,83	309,02	310,69	311,00	311,00	311,00
4,76	309,16	310,57	311,00	311,00	311,00
4,70	309,30	310,45	310,99	311,00	311,00
4,63	309,45	310,33	310,99	311,00	311,00
4,57	309,71	310,21	310,99	311,00	311,00
4,50	309,96	310,10	310,99	311,00	311,00
4,43	310,09	309,80	310,98	311,00	311,00
4,37	310,22	309,51	310,97	311,00	311,00
4,30	310,42	309,29	310,96	311,00	311,00
4,23	310,62	309,08	310,95	311,00	311,00
4,17	310,82	308,87	310,94	311,00	311,00
4,10	310,90	308,65	310,91	311,00	311,00
4,04	310,93	308,42	310,87	310,99	311,00
3,97	310,96	308,19	310,83	310,99	311,00
3,90	310,98	307,96	310,78	310,99	310,99
3,84	311,00	307,80	310,74	310,98	310,99
3,77	311,00	307,78	310,66	310,97	310,99
3,71	311,00	307,88	310,56	310,97	310,99
3,64	311,00	308,05	310,46	310,96	310,98
3,57	311,00	308,23	310,36	310,95	310,97
3,51	311,00	308,40	310,26	310,93	310,97
3,44	311,00	308,64	310,16	310,91	310,95
3,37	311,00	308,89	310,06	310,89	310,94
3,31	311,00	309,25	309,94	310,88	310,92
3,24	311,00	309,65	309,82	310,86	310,91
3,18	311,00	309,94	309,64	310,83	310,88

3,11	311,00	310,21	309,46	310,79	310,86
3,04	311,00	310,48	309,28	310,76	310,83
2,98	311,00	310,59	309,05	310,72	310,79
2,91	311,00	310,70	308,82	310,68	310,76
2,84	311,00	310,81	308,59	310,65	310,72
2,78	311,00	310,91	308,37	310,61	310,69
2,71	311,00	310,98	308,20	310,55	310,66
2,65	311,00	310,99	308,20	310,47	310,62
2,58	311,00	310,99	308,21	310,40	310,58
2,51	311,00	310,99	308,21	310,32	310,55
2,45	311,00	311,00	308,21	310,24	310,52
2,38	311,00	311,00	308,20	310,17	310,50
2,32	311,00	311,00	308,46	310,09	310,46
2,25	311,00	311,00	308,76	309,98	310,42
2,18	311,00	311,00	309,07	309,86	310,38
2,12	311,00	311,00	309,38	309,76	310,35
2,05	311,00	311,00	309,70	309,66	310,32
1,98	311,00	311,00	309,98	309,54	310,27
1,92	311,00	311,00	310,26	309,40	310,23
1,85	311,00	311,00	310,54	309,25	310,18
1,79	311,00	311,00	310,73	309,12	310,13
1,72	311,00	311,00	310,80	308,99	310,09
1,65	311,00	311,00	310,87	308,87	310,05
1,59	311,00	311,00	310,94	308,75	310,01
1,52	311,00	311,00	310,98	308,64	309,94
1,46	311,00	311,00	310,99	308,68	309,86
1,39	311,00	311,00	310,99	308,71	309,78
1,32	311,00	311,00	310,99	308,75	309,70
1,26	311,00	311,00	311,00	308,82	309,62

1,19	311,00	311,00	311,00	308,99	309,53
1,12	311,00	311,00	311,00	309,24	309,43
1,06	311,00	311,00	311,00	309,50	309,31
0,99	311,00	311,00	311,00	309,77	309,20
0,93	311,00	311,00	311,00	309,99	309,09
0,86	311,00	311,00	311,00	310,15	308,99
0,79	311,00	311,00	311,00	310,31	308,89
0,73	311,00	311,00	311,00	310,47	308,78
0,66	311,00	311,00	311,00	310,63	308,68
0,60	311,00	311,00	311,00	310,77	308,58
0,53	311,00	311,00	311,00	310,81	308,49
0,46	311,00	311,00	311,00	310,85	308,43
0,40	311,00	311,00	311,00	310,89	308,38
0,33	311,00	311,00	311,00	310,93	308,32
0,26	311,00	311,00	311,00	310,97	308,26
0,20	311,00	311,00	311,00	310,98	308,21
0,13	311,00	311,00	311,00	310,99	308,17
0,07	311,00	311,00	311,00	310,99	308,13
0,00	311,00	311,00	311,00	311,00	308,09

Diameter Cooling Tower (meter)	Temperatur terhadap Posisi Ketinggian Nosel				
	H = 4,8 meter	H = 4 meter	H = 3 meter	H = 2 meter	H = 1 meter
6,55	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6,48	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6,42	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
6,35	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00
6,29	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00
6,22	0,18	0,00	0,00	0,00	0,00
6,15	0,28	0,00	0,00	0,00	0,00
6,09	0,46	0,00	0,00	0,00	0,00
6,02	0,69	0,00	0,00	0,00	0,00
5,95	0,88	0,00	0,00	0,00	0,00
5,89	1,15	0,00	0,00	0,00	0,00
5,82	1,43	0,00	0,00	0,00	0,00
5,76	1,84	0,00	0,00	0,00	0,00
5,69	2,50	0,00	0,00	0,00	0,00
5,62	3,33	0,00	0,00	0,00	0,00
5,56	3,34	0,00	0,00	0,00	0,00
5,49	3,11	0,00	0,00	0,00	0,00
5,43	3,22	0,01	0,00	0,00	0,00
5,36	3,10	0,01	0,00	0,00	0,00
5,29	2,96	0,01	0,00	0,00	0,00
5,23	2,93	0,03	0,00	0,00	0,00
5,16	2,93	0,04	0,00	0,00	0,00
5,09	2,86	0,07	0,00	0,00	0,00
5,03	2,79	0,09	0,00	0,00	0,00
4,96	2,55	0,14	0,00	0,00	0,00
4,90	2,19	0,21	0,00	0,00	0,00

4,83	1,98	0,31	0,00	0,00	0,00
4,76	1,84	0,43	0,00	0,00	0,00
4,70	1,70	0,55	0,01	0,00	0,00
4,63	1,55	0,67	0,01	0,00	0,00
4,57	1,29	0,79	0,01	0,00	0,00
4,50	1,04	0,90	0,01	0,00	0,00
4,43	0,91	1,20	0,02	0,00	0,00
4,37	0,78	1,49	0,03	0,00	0,00
4,30	0,58	1,71	0,04	0,00	0,00
4,23	0,38	1,92	0,05	0,00	0,00
4,17	0,18	2,13	0,06	0,00	0,00
4,10	0,10	2,35	0,09	0,00	0,00
4,04	0,07	2,58	0,13	0,01	0,00
3,97	0,04	2,81	0,17	0,01	0,00
3,90	0,02	3,04	0,22	0,01	0,01
3,84	0,00	3,20	0,26	0,02	0,01
3,77	0,00	3,22	0,34	0,03	0,01
3,71	0,00	3,12	0,44	0,03	0,01
3,64	0,00	2,95	0,54	0,04	0,02
3,57	0,00	2,77	0,64	0,05	0,03
3,51	0,00	2,60	0,74	0,07	0,03
3,44	0,00	2,36	0,84	0,09	0,05
3,37	0,00	2,11	0,94	0,11	0,06
3,31	0,00	1,75	1,06	0,12	0,08
3,24	0,00	1,35	1,18	0,14	0,09
3,18	0,00	1,06	1,36	0,17	0,12
3,11	0,00	0,79	1,54	0,21	0,14
3,04	0,00	0,52	1,72	0,24	0,17
2,98	0,00	0,41	1,95	0,28	0,21

2,91	0,00	0,30	2,18	0,32	0,24
2,84	0,00	0,19	2,41	0,35	0,28
2,78	0,00	0,09	2,63	0,39	0,31
2,71	0,00	0,02	2,80	0,45	0,34
2,65	0,00	0,01	2,80	0,53	0,38
2,58	0,00	0,01	2,79	0,60	0,42
2,51	0,00	0,01	2,79	0,68	0,45
2,45	0,00	0,00	2,79	0,76	0,48
2,38	0,00	0,00	2,80	0,83	0,50
2,32	0,00	0,00	2,54	0,91	0,54
2,25	0,00	0,00	2,24	1,02	0,58
2,18	0,00	0,00	1,93	1,14	0,62
2,12	0,00	0,00	1,62	1,24	0,65
2,05	0,00	0,00	1,30	1,34	0,68
1,98	0,00	0,00	1,02	1,46	0,73
1,92	0,00	0,00	0,74	1,60	0,77
1,85	0,00	0,00	0,46	1,75	0,82
1,79	0,00	0,00	0,27	1,88	0,87
1,72	0,00	0,00	0,20	2,01	0,91
1,65	0,00	0,00	0,13	2,13	0,95
1,59	0,00	0,00	0,06	2,25	0,99
1,52	0,00	0,00	0,02	2,36	1,06
1,46	0,00	0,00	0,01	2,32	1,14
1,39	0,00	0,00	0,01	2,29	1,22
1,32	0,00	0,00	0,01	2,25	1,30
1,26	0,00	0,00	0,00	2,18	1,38
1,19	0,00	0,00	0,00	2,01	1,47
1,12	0,00	0,00	0,00	1,76	1,57
1,06	0,00	0,00	0,00	1,50	1,69



0,99	0,00	0,00	0,00	1,23	1,80
0,93	0,00	0,00	0,00	1,01	1,91
0,86	0,00	0,00	0,00	0,85	2,01
0,79	0,00	0,00	0,00	0,69	2,11
0,73	0,00	0,00	0,00	0,53	2,22
0,66	0,00	0,00	0,00	0,37	2,32
0,60	0,00	0,00	0,00	0,23	2,42
0,53	0,00	0,00	0,00	0,19	2,51
0,46	0,00	0,00	0,00	0,15	2,57
0,40	0,00	0,00	0,00	0,11	2,62
0,33	0,00	0,00	0,00	0,07	2,68
0,26	0,00	0,00	0,00	0,03	2,74
0,20	0,00	0,00	0,00	0,02	2,79
0,13	0,00	0,00	0,00	0,01	2,83
0,07	0,00	0,00	0,00	0,01	2,87
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,91



## BIOGRAFI PENULIS



Penulis adalah Judika Lodewijk Siagian yang lahir 22 tahun yang lalu di kota Pematangsiantar, 29 Maret 1996. Penulis mengeyam pendidikan dasar pada tahun 2002-2008 di Sekolah Dasar Assisi Pematangsiantar. Kemudian melanjutkan pendidikan Sekolah Menengah Pertama (SMP) Bintang Timur Pematangsiantar pada tahun 2008-2011 dan Sekolah Menengah Atas (SMA) Budi Mulia Pematangsiantar pada tahun 2011-

2014. Penulis kemudian melanjutkan pendidikan S1 di Institut Teknologi Sepuluh November (ITS) Departemen Teknik Fisika, Fakultas Teknologi Industri (FTI) pada tahun 2014 dan terdaftar dengan NRP 02311440000005.

Selama perkuliahan penulis aktif sebagai panitia diberbagai kegiatan di jurusan maupun organisasi yang ada di ITS. Penulis pernah menjabat sebagai ketua persekutuan doa Feknik Fisika ITS tahun 2016/2017. Berbagai seminar keilmiahan telah diikuti oleh penulis guna pengembangan diri menjadi lebih baik lagi. Penulis dapat dihubungi via email [lodik.gian@gmail.com](mailto:lodik.gian@gmail.com)